

文章编号 1004-924X(2016)05-1001-08

## 激光自混合干涉角度测量参数优化及旋转方向判别

钟金钢\*, 梁智强, 李仕萍

(暨南大学 光电工程系, 广东 广州 510632)

**摘要:**对反射旋转体引起聚焦激光自混合干涉信号位相与旋转角度的非线性关系进行了研究,提出了一个实验参数的优化方法来降低该非线性效应引起的非线性角度测量误差。重新评估了自混合干涉角度测量在测量范围扩大后的物理近似条件,从理论上分析了实验参数给角度测量带来的误差影响并进行了模拟仿真,提出了利用该非线性关系判别反射体旋转方向的方法。最后,进行了激光自混合干涉角度测量实验并给出若干个实验参数条件下分别得到的角度测量结果。实验结果表明,实验参数优化后,角度测量误差大幅减少;在最优情况下,比未优化方法的测量精度提升了一个数量级,可达  $10^{-5}$  rad,证明了提出的实验参数优化方法和反射体旋转方向判别方法的有效性。实验结果还显示,使用提出的方法在提高测量范围的同时仍能进行高精度的角度测量,从而进一步拓宽了基于反射体旋转引起的激光自混合干涉效应的应用范围。

**关键词:**激光自混合干涉;角度测量;非线性误差;参数优化;旋转方向

**中图分类号:**O436.1;TB922 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1001

### Parameter optimization and direction recognition in angle measurement by laser self-mixing interference

ZHONG Jin-gang\*, LIANG Zhi-qiang, LI Shi-ping

(Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

\* Corresponding author, E-mail: tzjg@jnu.edu.cn

**Abstract:** The nonlinear relationship between phase and rotation angle of a self-mixing interference signal caused by a reflector rotation was researched and an experimental parameter optimization method was proposed to reduce the nonlinear angle measurement errors from the nonlinear effect above mentioned. The physical approximate conditions in self-mixing type interferometry were re-evaluated for enlarged angle measurement range, the effect of experimental parameters on the errors of angle measurement was analyzed theoretically and simulations were carried out subsequently. A new method relied on the nonlinear relationship to recognize the direction of rotation was introduced. Finally, self-mixing interference experiments for angle measurement were performed and the results corresponding to different conditions were given. The results show that errors of focused laser self-mixing type interferometry are reduced remarkably, and the measurement precision reaches to  $10^{-5}$  rad, which is increased by one order of magnitude as compared with that of the non-optimized

收稿日期:2015-12-31;修订日期:2016-02-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61475064);广东省科技计划资助项目(No. 2013B060100001);广东省自然科学基金资助项目(No. 2015A030310458)

scheme. These results verify the evidences of the optimization scheme for the recognition of rotating direction and the improvement of measurement accuracy. Moreover, as the high accuracy of measurement maintains angle measurement ranges enlarged, it broadens applications of laser self-mixing interferometry based on the reflector rotation.

**Key words:** laser self-mixing interferometry; angle measurement; nonlinear error; parameter optimization; rotating direction

## 1 引言

激光自混合干涉效应是指射出激光受外部物体反射或者散射后,部分激光又重新返回激光腔内并与腔内的激光发生干涉,引起激光器输出光强及频率发生变化的现象<sup>[1-6]</sup>。相比传统的激光干涉仪,激光自混合干涉仪只需一个光路通道,具有结构简单、紧凑性好等特点,可在多种应用场合中替代传统的干涉仪,因此引起了国内外科研人员的兴趣<sup>[5-6]</sup>。目前,激光自混合干涉可用于位移<sup>[6-8]</sup>、速度<sup>[9-10]</sup>、应力<sup>[11]</sup>和薄片厚度<sup>[12]</sup>等物理参数的测量。

角度测量在航空航天、工业等领域具有非常重要的应用<sup>[13]</sup>。常规的角度测量方法主要有机械测量方法和光学测量方法。其中,光学角度测量方法具有非接触、高准确度、快速等独特的优势,所以其应用也越来越广泛。目前,常用的光学角度测量方法有光学分度头法、多面棱体法、光电编码器法、衍射法和干涉法等<sup>[14]</sup>。其中,利用光学干涉效应进行精密角度测量的方法主要有迈克尔逊干涉角度测量法<sup>[15]</sup>和双频激光外差干涉测量法<sup>[16]</sup>等。反射体旋转也能引起激光自混合干涉效应的现象被发现后,本课题组将该现象应用于测量旋转角度<sup>[17-18]</sup>以及确定物体的旋转中心<sup>[19]</sup>,但是非聚焦激光自混合角度的测量范围很小,制约了其应用范围,最近我们又研究了由反射体旋转引起的聚焦激光束自混合干涉现象,并利用聚焦激光束来扩大角度的测量范围<sup>[20]</sup>。然而,随着旋转角度的扩大,激光自混合干涉信号位相与旋转角度之间会呈现非线性关系,这种非线性关系导致角度测量出现非线性误差。本文详细分析了该非线性关系产生的原因,并提出了一种降低该非线性误差的实验参数优化方法,利用该非线性关系还可判别反射体的旋转方向。该参数优

化方法能够使测量系统拥有较好的线性度,在增大角度测量范围的同时,保证了较高的测量精度,从而拓宽了激光自混合干涉角度测量方法的应用范围。

## 2 反射体旋转引起激光自混合干涉效应及角度测量原理

图 1 为反射体旋转产生的激光自混合干涉现象的示意图。

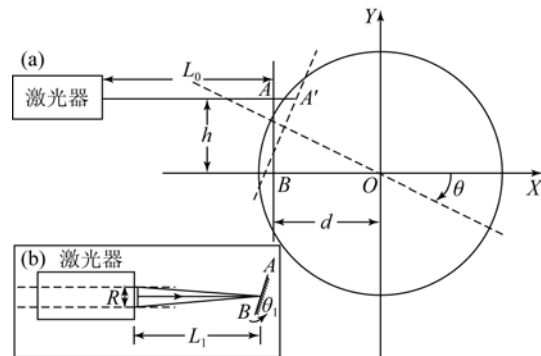


图 1 反射体旋转引起的激光自混合干涉示意图(a)原理图;(b)角度范围

Fig. 1 Laser self-mixing interference caused by a rotatable reflector. (a) Schematic diagram; (b) Angle range

图 1(a)中,AB 为设置在旋转物体上的一平面反射镜,将通过旋转中心  $O$  并垂直于反射镜  $AB$  方向的直线设为  $X$  轴,建立以  $O$  为原点的直角坐标系,转轴通过  $O$  点垂直于  $XY$  构成的平面。当反射镜表面的法线方向与入射激光束间的角度等于零时,称该位置为零位。 $\theta$  为反射体旋转的角度,当反射镜位置处于零位时, $\theta$  为零度,反射镜表面的法线相对零位处于顺时针方向时  $\theta$  大于零,处于逆时针方向时  $\theta$  小于零。 $h$  为入射激光束偏离旋转中心的距离, $d$  为反射镜位于零

位时反射镜表面到旋转中心的距离,  $L_0$  为平面反射镜置于零位时激光器谐振腔发射端至反射镜之间的距离。

以平面反射镜的反射点位于直角坐标系  $XY$  的第二象限时为例,当旋转物体旋转了角度  $\theta$  后,平面反射镜也随之旋转了  $\theta$ ,此时平面镜的激光反射点移到了图 1 的  $A'$  点,根据几何关系,可以得出外腔长度的变化量  $\Delta L$  和角度  $\theta$  之间的关系<sup>[17]</sup>:

$$\Delta L = AA' = \left[ h - d \tan \frac{\theta}{2} \right] \tan \theta. \quad (1)$$

图 1(b) 为非聚焦激光束情况下,反射光束能进入激光腔内的角度范围示意图。 $R$  为激光器出光口直径,受激光器出光口径的限制,激光自混合干涉的旋转角度被局限在非常小的范围内(如小型 He-Ne 激光器的出光孔径小于 2 mm,一般情况下角度的变化范围远小于  $1^\circ$ )<sup>[20]</sup>:

$$\theta_1 \approx 2 \arctan \left[ \frac{R}{2L_0} \right], \quad (2)$$

近似:

$$\tan \theta \approx \theta, \quad (3)$$

$$\tan \theta \tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta^2}{2} \approx 0. \quad (4)$$

在此近似条件下得到外腔长差与旋转角度的关系:

$$\Delta L = h\theta. \quad (5)$$

设置条件如下:(1)整个激光自混合干涉系统在弱反馈的情况下工作,忽略多重反馈;(2)实验采用单模激光器,基于单模激光自混合干涉效应;(3)反馈光导致激光器输出光的频率变化很小,可视为不引起光频的变化<sup>[4-5]</sup>。此时激光器的输出功率为<sup>[5]</sup>:

$$p = p_0 \left[ 1 + \mu \cos \left[ 4\pi \frac{L_0 + h\theta}{\lambda} \right] \right], \quad (6)$$

式中:  $p_0$  为无反馈光时激光器的输出功率;  $\lambda$  为激光波长;  $\mu$  为与反馈量有关的比例系数。

由此得出激光自混合干涉信号的位相变化与旋转角度  $\theta$  呈线性关系,即:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} h\theta. \quad (7)$$

根据这一关系,利用干涉信号的位相变化值  $\Delta \varphi$ ,即可获得旋转角度  $\theta$ 。但由于产生自混合干涉的角度变化范围很小,因此只能利用该效应进行微小角度的测量。

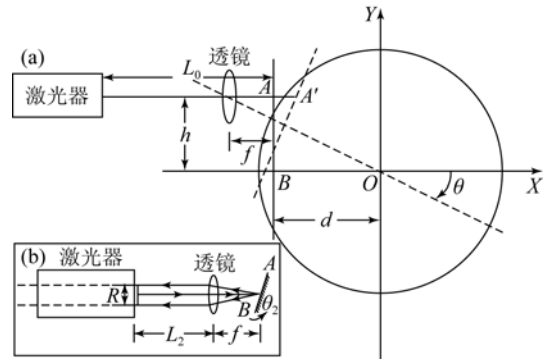


图 2 聚焦激光束自混合干涉示意图(a)原理图;(b)角度范围

Fig. 2 Focused laser self-mixing interference caused by a rotatable reflector. (a) Schematic diagram; (b) Angle range

为了增大角度测量范围,将激光束聚焦后入射到旋转体<sup>[20]</sup>,如图 2(a)所示。与非聚焦激光束自混合干涉原理图不同,图 2 中增加了聚焦物镜,把平面反射镜放置在物镜的焦点处,激光器发射的激光束经物镜聚焦到平面反射镜上,偏离光轴的反射光又透过物镜重新返回激光腔内。通过增加显微物镜能够扩大产生激光自混合干涉的角度范围,如图 2(b)所示,  $L_2$  为激光器到显微物镜的距离,  $f$  为显微物镜的焦距,此时产生自混合干涉的角度范围为<sup>[20]</sup>:

$$\theta_2 \approx 2 \arctan \left[ \frac{R}{2f} \right]. \quad (8)$$

因为显微物镜的焦距较小,增加显微物镜通常能使自混合干涉角度测量范围增大一个数量级以上。实验表明,如果使用一个 10 倍的显微物镜,测量角度可由原来的  $(-0.06^\circ, 0.06^\circ)$  提高到  $(-1^\circ, 1^\circ)$  左右<sup>[20]</sup>。

### 3 聚焦自混合干涉信号位相与旋转角度之间的非线性关系分析

在聚焦激光束自混合干涉条件下,虽然增加物镜会导致旋转物体旋转  $\theta$  角度后稍微偏离焦点,但由于角度  $\theta$  较小(小于  $5^\circ$ ),外腔长度的变化量  $\Delta L$  和角度  $\theta$  之间的关系仍然可用式(1)近似表示。在角度测量过程中,随着旋转角度的增大,实验发现自混合干涉信号的位相与旋转角度之间呈现非线性关系。这时,需要重新考虑式(3)、

式(4)给出的自混合干涉效应下激光输出光强的近似条件。首先式(3)中将  $\tan \theta$  近似为  $\theta$  产生的理论相对误差为:

$$\Delta e_1 = \left| \frac{\theta - \tan \theta}{\tan \theta} \right|, \quad (9)$$

式中  $\Delta e_1$  为相对测量误差。假设激光自混合干涉仪的最大测量角度为  $10^\circ$ , 那么  $\Delta e_1$  小于 1.1%。在实践中, 基于聚焦激光束自混合干涉效应的角度测量范围仍小于  $5^\circ$ , 因此近似条件式(3)仍然可以满足线性关系。

然后分析式(4)近似给式(6)带来的影响。由式(8)可知, 在激光自混合干涉角度测量仪的测量范围较小的情况下(通常小于  $5^\circ$ ), 仍可以将  $\tan \theta$  近似为  $\theta$ , 修改式(4)后得到新的近似条件:

$$\tan \theta \approx \theta, \quad (10)$$

$$\tan \theta \tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}. \quad (11)$$

在此近似条件下, 外腔长变化量与旋转角度的关系为:

$$\Delta L = h\theta - \frac{d}{2}\theta^2. \quad (12)$$

将自混合干涉信号位相与旋转角度视作线性关系而带来的理论误差  $\Delta e_2$  为:

$$\Delta e_2 = |\theta' - \theta|, \quad (13)$$

及

$$h\theta' = h\theta - \frac{d}{2}\theta^2, \quad (14)$$

式中:  $\theta$  为实际旋转角度,  $\theta'$  为将外腔长差与旋转角度的关系进行线性近似时计算得到的角度。将式(14)代入式(13)求得:

$$\Delta e_2 = \left| \frac{K\theta^2}{2} \right|, \quad (15)$$

式中  $K = \frac{d}{h}$ 。如果不考虑非线性项  $\left[ -\frac{d}{2}\theta^2 \right]$ , 那么线性近似所带来的测量误差  $\Delta e_2$  与角度  $\theta$  的平方呈线性关系; 且反射镜旋转角度  $\theta$  相同的情况下,  $K$  值越大则相对误差  $\Delta e_2$  越大。当  $K=10$ , 旋转角度为  $1^\circ$  时, 式(15)给出的线性近似误差已达  $\Delta e_2 \approx 1.5 \times 10^{-3}$  rad (约等于  $0.087^\circ$ , 相对误差达 8.7%)。理论表明: 当  $K$  较大或  $\theta$  较大时, 线性近似带来的误差不能忽视。

那么, 在新的近似条件下, 将式(6)给出的激

光器输出功率改写为:

$$p = p_0 \left[ 1 + \mu \cos \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \left[ L_0 + h\theta - \frac{d}{2}\theta^2 \right] \right\} \right], \quad (16)$$

非线性项  $\left[ -\frac{d}{2}\theta^2 \right]$  使自混合干涉信号的位相

随角度呈非线性变化, 导致角度测量结果出现非线性误差。为了尽量降低该误差, 本文提出一个实验参数优化方法, 即在角度测量时, 应尽量使实验参数  $K$  值  $\left[ K = \frac{d}{h} \right]$  比较小。

#### 4 利用非线性关系判别反射体的旋转方向

已知旋转中心与激光束在反射体表面入射点的相对位置, 由式(16)可以得出随角度变化的位相为:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ h\theta - \frac{d}{2}\theta^2 \right]. \quad (17)$$

图 3 给出了根据式(7)和式(17)模拟得到的自混合干涉信号的位相变化值  $\Delta \varphi$  与角度  $\theta$  的关系曲线, 其中  $h=1.45$  mm,  $d=15$  mm。

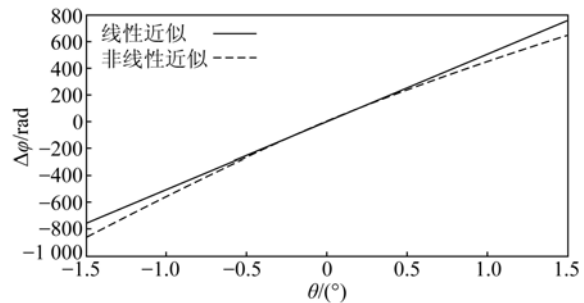


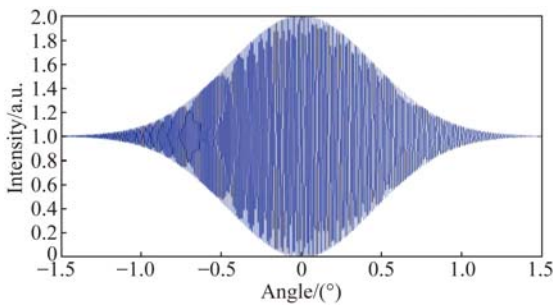
图 3 角度-位相关系模拟曲线

Fig. 3 Simulation curve of angle versus phase

图 3 中虚线表示引入非线性项时所得的模拟位相曲线, 当反射体沿顺时针旋转时, 对应角度  $\theta$  从横坐标的负无穷方向到正无穷方向的位相变化曲线; 而当反射体沿逆时针旋转时, 则对应  $\theta$  从横坐标的正无穷方向到负无穷方向的位相变化曲线。模拟结果表明, 相对零位的非对称现象是存在的。

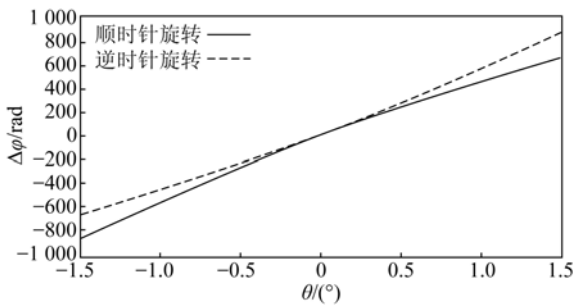
图 4(a) 为反射体沿着顺时针旋转时激光自混合干涉信号的模拟图。分别对顺时针旋转和逆时针旋转情况下得到的模拟信号进行位相解调,

结果如图 4(b)所示。图中信号位相解调方向一致且将位相零点设定在角度零点处。反射体在顺时针旋转的情况下,激光自混合干涉信号的位相变化过程是先快后慢,位相-角度曲线开口向下;反射体在逆时针旋转的情况下,激光自混合干涉信号的位相变化过程是先慢后快,位相-角度曲线开口向上。显然,根据自混合干涉信号随旋转角度的解调位相速度变化和位相曲线的开口方向,可以判断反射物体的旋转方向。



(a) 反射体顺时针旋转下的激光自混合干涉信号

(a) Signals in clockwise rotation



(b) 模拟信号的位相解调结果

(b) Result of phase demodulation

图 4 激光自混合干涉信号的模拟仿真

Fig. 4 Simulation of laser self-mixing interference signals

### 5 实验

为了证明上述理论的正确性,进行了激光自混合干涉角度测量实验,图 5 为实验装置示意图。实验使用腔长为 150 mm、功率为 0.8 mW、输出波长为 632.8 nm、模式为 TEM<sub>00</sub> 的 He-Ne 激光器。激光器出射光经过一个放大倍数为 10、数值孔径为 0.25 的显微物镜,入射到一个表面反射率约为 4% 的平面反射镜上,平面反射镜固定在一个由步进电机驱动的旋转平台上。自混合干涉信

号由放置在激光器尾光出口处的光电探测器获取,光电探测器将光信号转换成电压信号,经放大处理后由信号采集卡采集并进行模数转换,然后由计算机进行后续的数据处理。

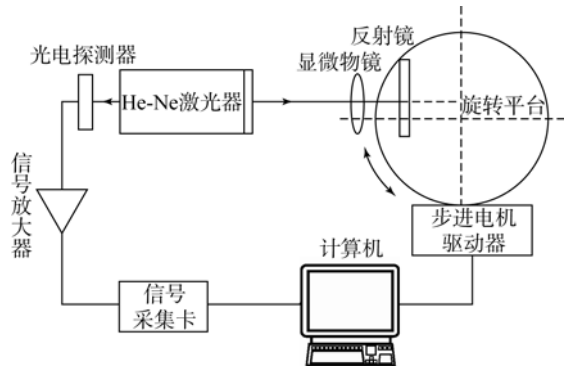
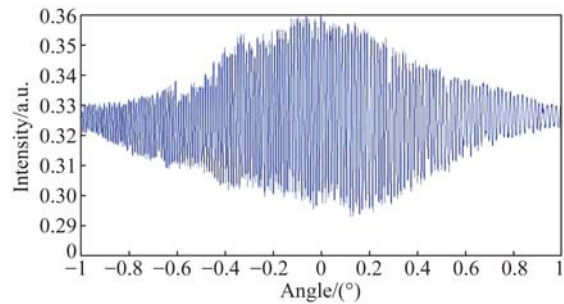


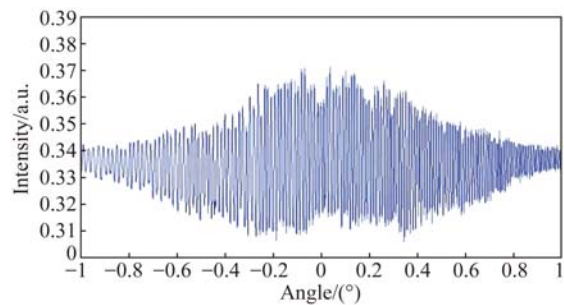
图 5 激光自混合干涉角度测量实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of laser self-mixing interference angle measurement



(a) 顺时针旋转

(a) Clockwise rotation



(b) 逆时针旋转

(b) Anticlockwise rotation

图 6 反射体旋转下的聚焦激光束自混合干涉信号

Fig. 6 Focused laser self-mixing interference signals caused by rotatable reflector

图 6(a)和 6(b)分别为 10 倍的显微物镜聚焦下顺时针旋转和逆时针旋转得到的激光自混合干

涉信号。实验参数为  $h=1.45\text{ mm}$ ,  $d=24.15\text{ mm}$ , 旋转中心位于激光束的下方。由图可知, 顺时针旋转时的自混合干涉信号中左边的条纹比右边的条纹要密一些; 而逆时针旋转时的自混合干涉信号则情况相反。然后利用傅里叶变换位相解调方法<sup>[21-22]</sup>处理该实验参数下的顺时针旋转和逆时针旋转, 获取到自混合干涉信号位相, 并将位相曲线零点移到角度零点处, 解调结果如图 7 所示。实验结果与理论分析一致, 自混合干涉信号与旋转角度之间呈非线性关系。反射镜沿顺时针旋转时, 解调位相变化是先快后慢, 位相曲线表现为向上凹; 逆时针旋转时, 解调位相变化是先慢后快, 位相曲线则表现为向下凸。

为了验证实验参数优化方法的可靠性, 在不同的实验参数下进行了激光自混合干涉角度测量实验, 以步进电机的旋转角度作为参考值(步进电机的角度分辨率为  $5.45 \times 10^{-6}\text{ rad}$ , 和不存在非

线性问题的非聚焦激光自混合干涉角度测量精度  $10^{-6}\text{ rad}$ <sup>[17]</sup>相当), 比较在不同实验参数下得到的测量误差。图 8(a)、8(b)、8(c)分别为  $K$  取 0, 3, 7 三种不同实验参数下获得的激光自混合干涉信号, 此时  $h$  均等于  $2.9\text{ mm}$ 。

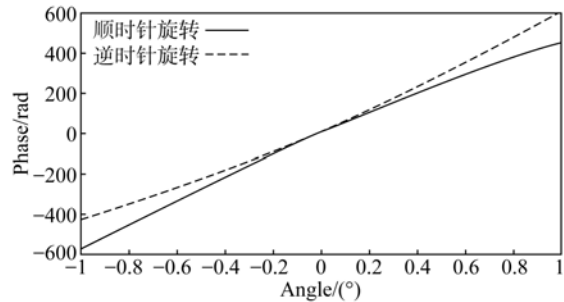


图 7 激光自混合干涉信号解调位相曲线

Fig. 7 Demodulation curves of laser self-mixing interference

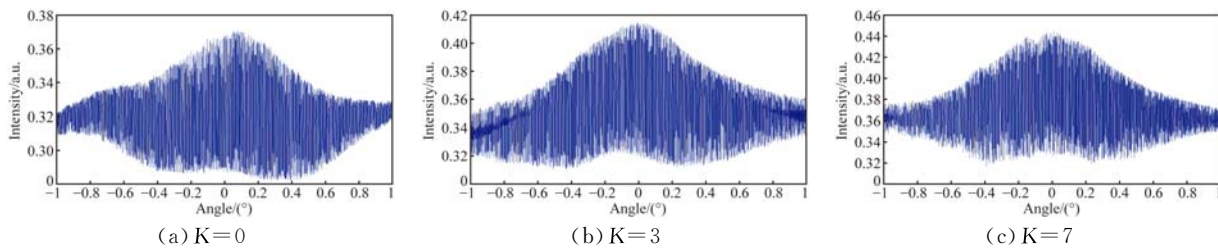


图 8 不同参数下的自混合干涉信号图

Fig. 8 Signals of laser self-mixing interference with different  $K$

用傅里叶位相解调方法对自混合干涉信号进行位相解调, 结果分别如图 9(a)、9(b)、9(c)所示。当  $K=0$  时, 从图 9(a)的解调位相曲线可以

看出位相和角度之间呈很好的线性关系; 而当  $K=7$  时, 图 9(c)的解调位相曲线则存在一定程度的弯曲; 当  $K=3$  时, 图 9(b)的情况处于两者之间。

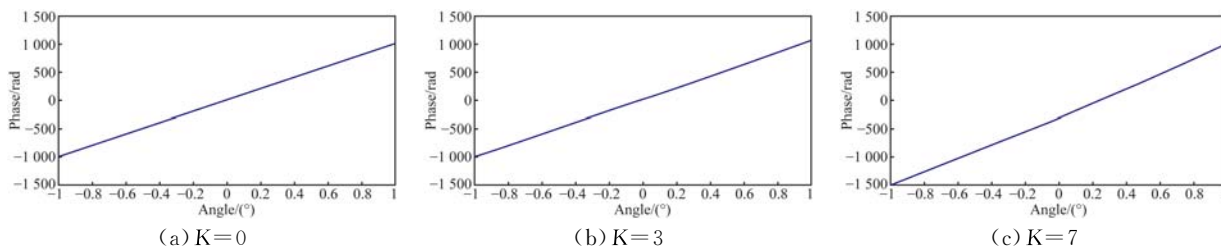


图 9 不同参数下的自混合干涉信号位相曲线

Fig. 9 Phase curves of self-mixing interference signals with different  $K$

已知位相差和旋转角度为线性关系  $\left[ \Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} h\theta \right]$ , 那么可通过解调位相计算出旋转角度。图 10(a)、10(b)、10(c)为 3 个不同实验参数

下计算得到的角度值与实际旋转角度之间的差值分布曲线图, 横坐标表示物体的实际旋转角度, 纵坐标表示角度误差值。

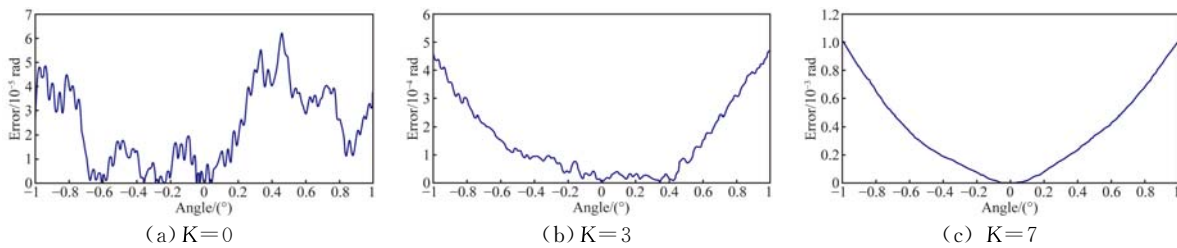


图10 误差分布曲线

Fig. 10 Measured error distribution

从实验结果可以看出,  $K$  值越大, 测量误差越大, 在角度相同的情况下,  $K$  为零时的误差比其它两种  $K$  值的误差至少低一个数量级; 对相同的  $K$  值来说, 旋转角度越大, 由非线性项引起的误差也越大。为了验证实验结果的重复性, 每组参数进行了 7 次角度测量实验, 都得出了上述相同的实验规律。由此说明通过合理地设置实验参数, 可以有效地降低非线性效应带来的误差。在  $K=0$  的情况下, 测量精度可达  $10^{-5}$  rad, 保证了测量范围内激光自混合干涉角度的高精度测量。

## 6 结 论

本文研究了反射旋转体引起的聚焦激光自混合干涉信号位相与旋转角度的非线性关系, 重新

评估了添加聚焦透镜后旋转体反射的自混合干涉效应的近似条件, 分析了自混合干涉信号与旋转角度之间非线性关系的产生原因, 并利用非线性关系提出了一种用于判别反射物旋转方向的方法, 以及减小非线性测量误差的实验参数优化方法。验证实验表明, 优化后聚焦激光自混合干涉的角度测量误差可大幅减少, 测量精度至少提高了一个数量级, 可达  $10^{-5}$  rad。本文提出的优化方法在提高测量范围的同时仍能进行高精度的角度测量, 拓宽了激光自混合干涉效应的应用范围。需要指出的是, 本文提出的自混合干涉角度测量方法和其它干涉测量方法一样, 仍然不能区分物体平动和转动引起的光程变化, 因此该方法只适用于物体只有转动没有平动时的角度测量。

## 参考文献:

- (in Chinese)
- [1] ROY L, KOHROH K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *Quantum Electronics*, 1980, 16(3):34-355.
  - [2] 马军山, 王向朝, 方祖捷, 等. 激光自混合干涉仪的实验研究[J]. *中国激光*, 2001, 28(1):29-32.  
MA J SH, WANG X ZH, FANG Z J, *et al.*. Experimental study on self-mixing interferometer in laser diode[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(1):29-32. (in Chinese)
  - [3] 丁迎春, 张书练, 李岩. He-Ne 激光自混合干涉的模式研究[J]. *激光杂志*, 2003, 24(6):16-17.  
DING Y CH, ZHANG SH L, LI Y. Research on the mode of self-mixing interference in He-Ne laser[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(6):16-17. (in Chinese)
  - [4] 郝辉, 夏巍, 王鸣, 等. 光纤激光器自混合干涉效应研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(23):2342021-2342026.  
HAO H, XIA W, WANG M, *et al.*. Self-mixing interference effect based on fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(23):2342021-2342026. (in Chinese)
  - [5] 毛威, 张书练, 张连清, 等. 激光回馈效应及其传感应用研究的进展[J]. *光学技术*, 2007, 33(1):16-22.  
MAO W, ZHANG SH L, ZHANG L Q, *et al.*. Optical feedback effect and the optical feedback interferometry for sensing application [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1):16-22. (in Chinese)
  - [6] DONATI S, 王昭, 禹延光. 用于光电仪器和相关测量的自混合干涉技术(特邀)[J]. *中国光学*, 2012, 5(2):93-115.  
DONATI S, WANG ZH, YU Y G. Self-mixing interferometry used for instrumentations and measurements(invited)[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2):93-115. (in Chinese)
  - [7] 杨颖, 李醒飞, 寇科, 等. 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8):1740-1746.  
YANG Y, LI X F, KOU K, *et al.*. Application of all-phase spectral analysis to self-mixing interferometry for displacement measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8):1740-1746. (in Chinese)

- [8] 张玉燕,周航,闫美素. 基于经验模态分解的自混合干涉相位提取方法研究[J]. 物理学报, 2015, 64(5):0542031-0542038.  
ZHANG Y Y, ZHOU H, SHAN M S. Study on the phase-extracting method of self-mixing signal based on empirical mode decomposition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(5): 0542031-0542038. (in Chinese)
- [9] 姚臣益. 激光多普勒自混频技术的研究[J]. 中国新通信, 2015, 17(10):113.  
YAO CH Y. Study on laser Doppler self-mixing technology[J]. *China New Telecommunications*, 2015, 17(10):113. (in Chinese)
- [10] 吕亮,张可,戴绩俊,等. 基于垂直腔面发射半导体激光器的自混合测速实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1):23-28.  
LÜ L, ZHANG K, DAI J J, *et al.*. Self-mixing velocimetry based on vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 23-28. (in Chinese)
- [11] 牛海莎,牛燕雄,刘宁,等. 外腔镜非线性运动对激光回馈应力测量系统精度的影响及修正[J]. 物理学报, 2015, 64(8):187-192.  
NIU H SH, NIU Y X, LIU N, *et al.*. Correction of error induced by nonlinear movement of feedback mirror in laser feedback stress measurement system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 187-192. (in Chinese)
- [12] MOHAMMAD T F, SILVANO D. Thickness measurement of transparent plates by a self-mixing interferometer[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11):1339-1341.
- [13] 陆卫国,吴易明,高立民,等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3):539-545.  
LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):539-545. (in Chinese)
- [14] 浦昭邦,陶卫,张琢. 角度测量的光学方法[J]. 光学技术, 2002, 28(2):168-171.  
PU ZH B, TAO W, ZHANG ZH. Angle measurement with optical methods[J]. *Optical Technology*, 2002, 28(2):168-171. (in Chinese)
- [15] IKRAM M, HUSSIAN G. Michelson interferometer for precision angle measurement[J]. *Applied Optic*, 1999, 38(1):113-120.
- [16] PAN S, STIJINS E. Improving the linearity of the Michelson interferometric angular measurement by a parameter compensation method[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(1):44-51.
- [17] ZHONG J G, ZHANG X H, JU Z X. Absolute small-angle measurement based on optical feedback interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, 6(11):830-832.
- [18] 钟金钢,琚志祥. 基于激光自混合干涉的微小角度测量方法及装置:中国, ZL200610123674. 6. [P]. [2007-05-16].  
ZHONG J G, JU ZH X. *Measurement and Equipment of Microangle Based on Laser Self-mixing Interference: China*, ZL200610123674. 6. [P]. [2007-05-16]. (in Chinese)
- [19] 檀磊,齐攀,陈纯,等. 基于激光自混合干涉的物体旋转中心确定方法[J]. 光学技术, 2011, 37(2):139-142.  
TAN L, QI P, CHEN CH, *et al.*. Determination of rotation center based on laser self-mixing interference[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(2):139-142. (in Chinese)
- [20] 郭扬,钟金钢. 由反射体旋转引起的聚焦激光束自混合干涉现象[J]. 中国激光, 2015, 42(3):257-262.  
GUO Y, ZHONG J G. Focused laser self-mixing interference caused by rotatable reflector[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2015, 42(3):257-262. (in Chinese)
- [21] MITSUO T, HIDEKI I, SEIJI K. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *JOSA*, 1982, 72(1):156-160.
- [22] MING W. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis[J]. *Optics and Laser Technology*, 2001, 33(6):409-416.

#### 作者简介:



钟金钢(1964—),男,江西新余人,博士,教授,主要从事光电检测技术、光电信息获取与处理技术的研究。E-mail: tzjg@jnu.edu.cn



梁智强(1990—),男,广东佛山人,硕士研究生,2009年于华南农业大学获得学士学位,主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: lzq90@foxmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)